

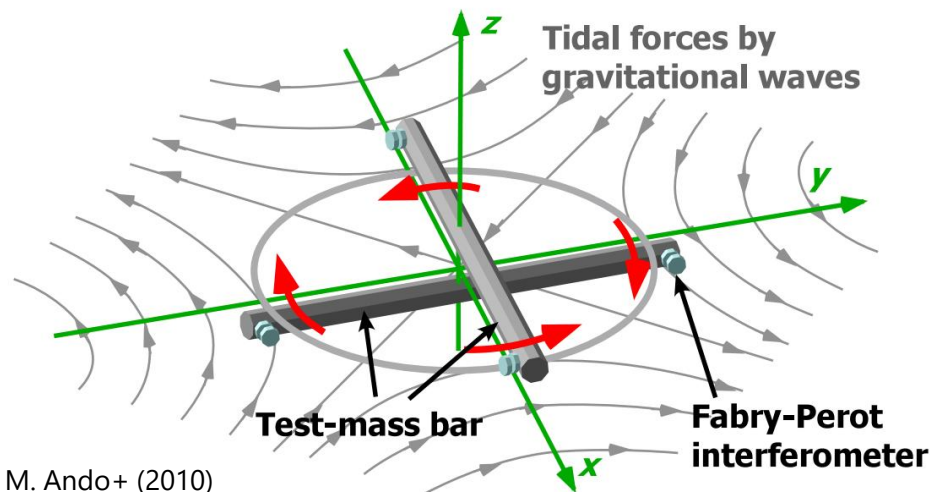
ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(48): 高感度ねじれ振り子の開発

大島 由佳^A, 杉岡 達哉^A, 高野 哲^B, 杉本 良介^A, 亀 伸樹^C,
綿田 辰吾^C, 横澤 孝章^D, 三代木 伸二^D, 鷺見 貴生^E,
宗宮 健太郎^F, 道村 唯太^G, 小森 健太郎^G, 安東 正樹^{A,G}

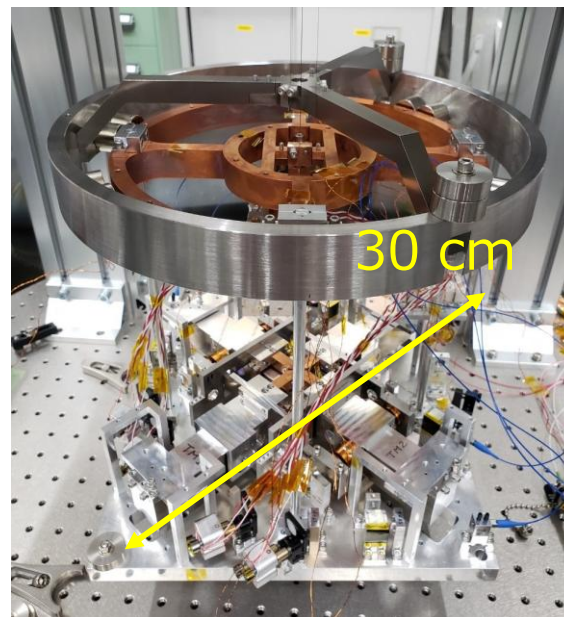
東大理^A, AEI^B, 東大地震研^C, 東大宇宙線研^D,
国立天文台^E, 東京科学大^F, 東大ビッグバン^G

概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBAで0.1 Hz帯の重力波観測を目指している
- 35 cmスケールのPhase-III TOBAを開発中
- Phase-III TOBAの光学系と懸架系の設計・開発を行った
 - ・ 差動ファブリペロー共振器(TOBA初)・光てこ
 - ・ 低温シリコン仕様・アルミニウム製のねじれ振り子
 - ・ 縦防振のためのGASフィルタ(TOBA初)
 - ・ 性能評価・光てこによる回転計測

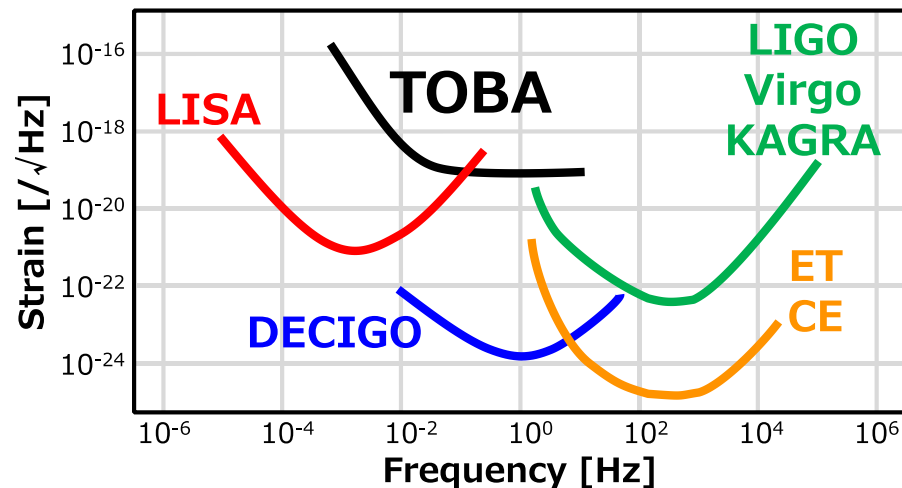
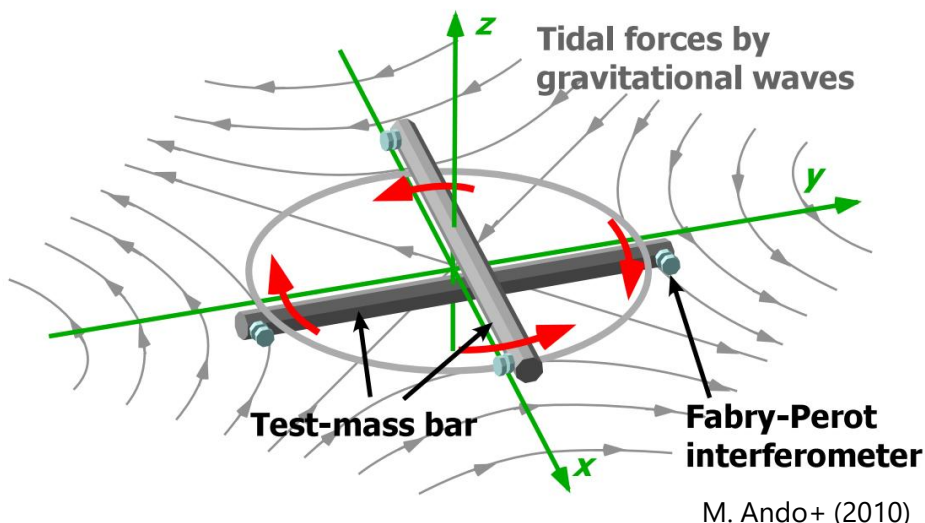


M. Ando+ (2010)



ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBA

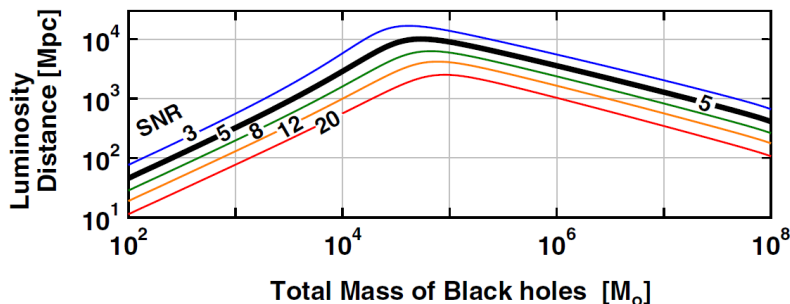
- TOBA: Torsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスでねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
 - 地上で0.1 Hz-10 Hzの重力波が観測可能
- 宇宙打ち上げの技術開発・コストが抑えられる
- 地上にあるためメンテナンスが簡単



TOBAで得られるサイエンス

低周波の重力波観測

- 中間質量ブラックホール連星合体
 - ~1 Mpc以内 (Phase-III)
 - ~10 Gpc以内 (Final)
- 大質量ブラックホール形成過程の解明



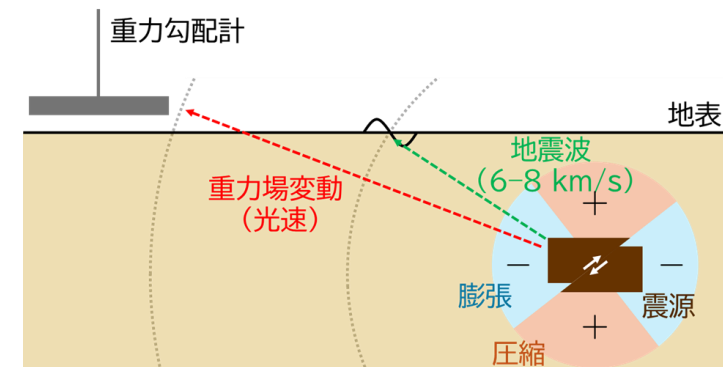
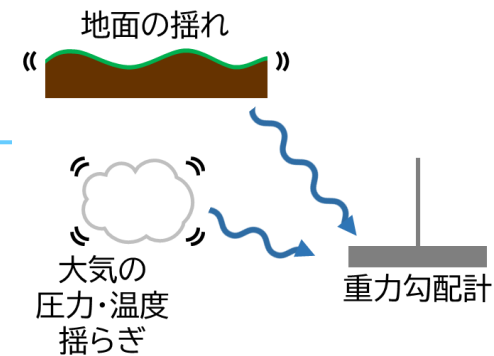
M. Ando+ (2010)

● 背景重力波

- $\Omega_{GW} \sim 10^{-7}$
@ 0.1 Hz (Final)
- 初期宇宙の直接探査

地球物理の観測

- 重力勾配雑音
 - 初の直接検出 (Phase-III)
 - 第3世代重力波望遠鏡の雑音低減
- より早い地震速報
 - 100 km先のM6の地震を早期検出 (Phase-III)
 - 災害被害の軽減



TOBA開発のロードマップ

Phase-I TOBA
(2009-2011)

Phase-II TOBA
(2012-2014)

原理実証

10^{-8} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
20 cmテストマス
常温



Phase-III TOBA
(2018-現在)

雑音低減技術の確立
ニュートニアン雑音検出
地震速報

10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cmテストマス
低温



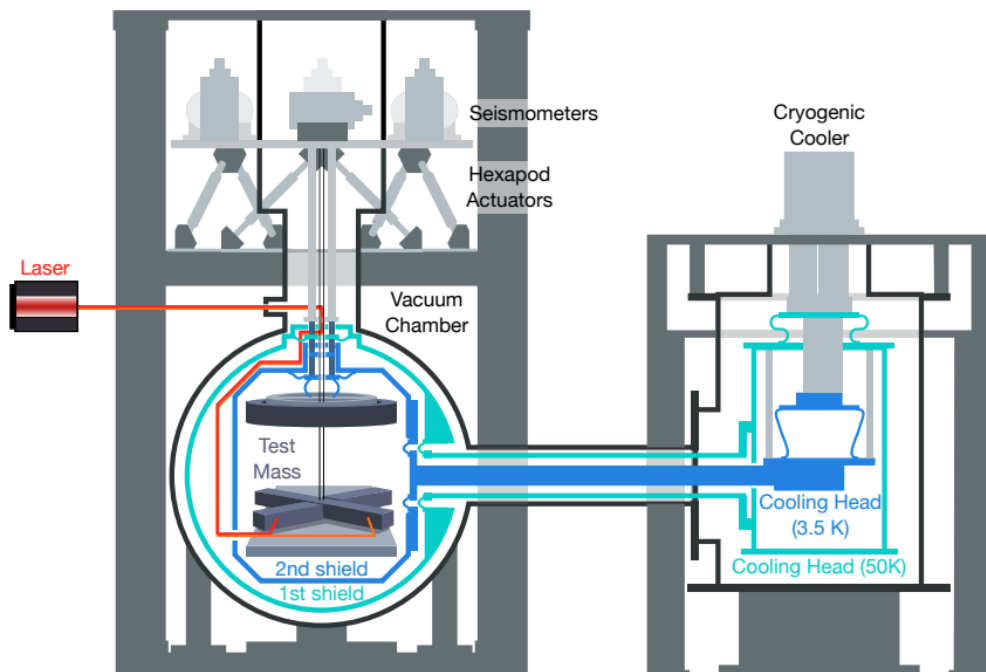
Final TOBA
(将来計画)

重力波観測

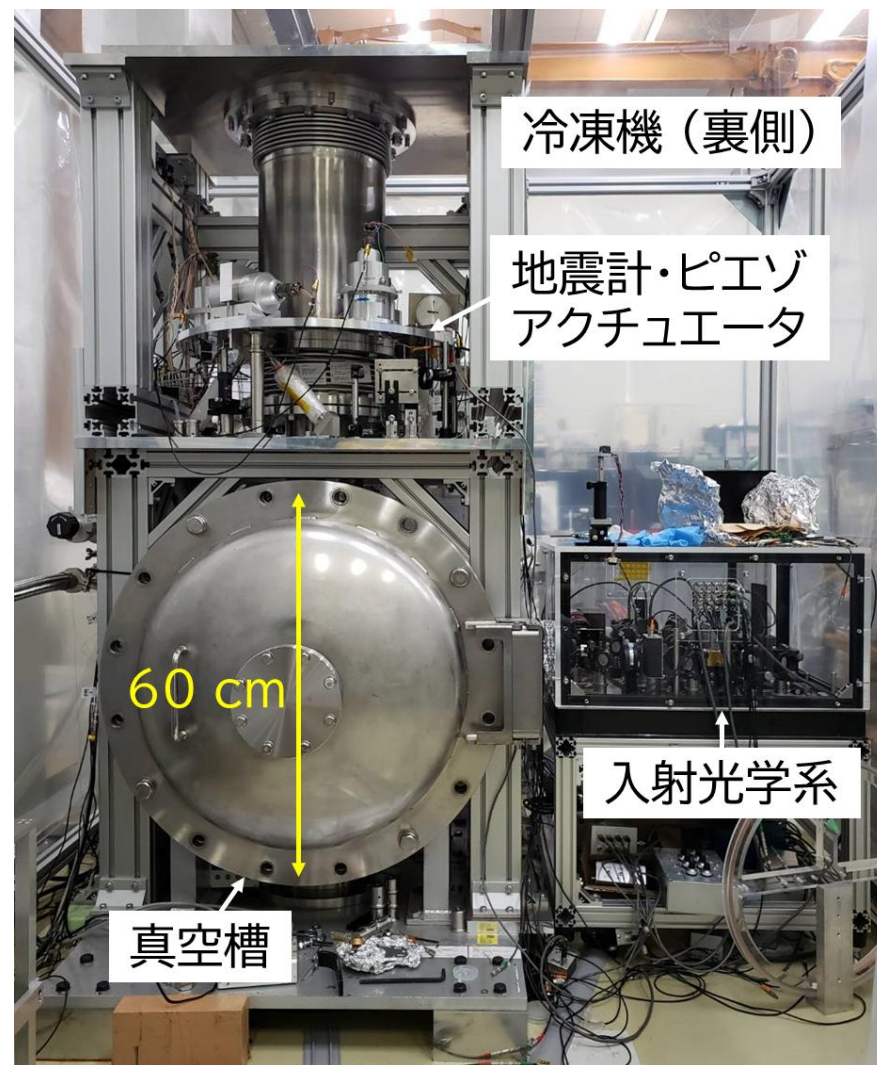
10^{-19} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
10 mテストマス
低温

Phase-III TOBAの構成

- 光学系: ねじれ回転検出
- 懸架系: ねじれ振り子
- 冷却系: 振り子を低温化
- 防振系: 懸架点を能動防振

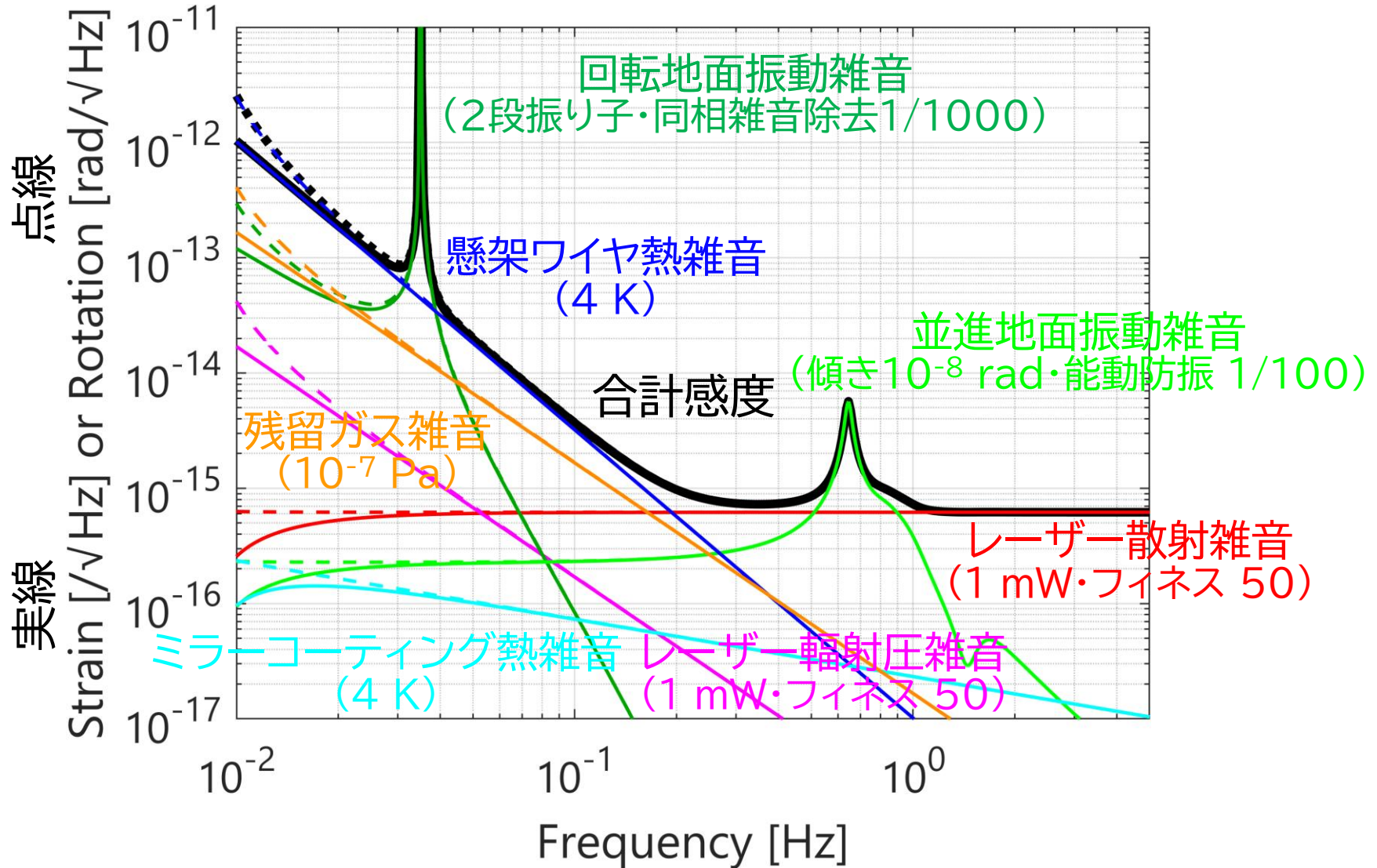


S. Takano, T. Shimoda, YO+, Galaxies (2024)



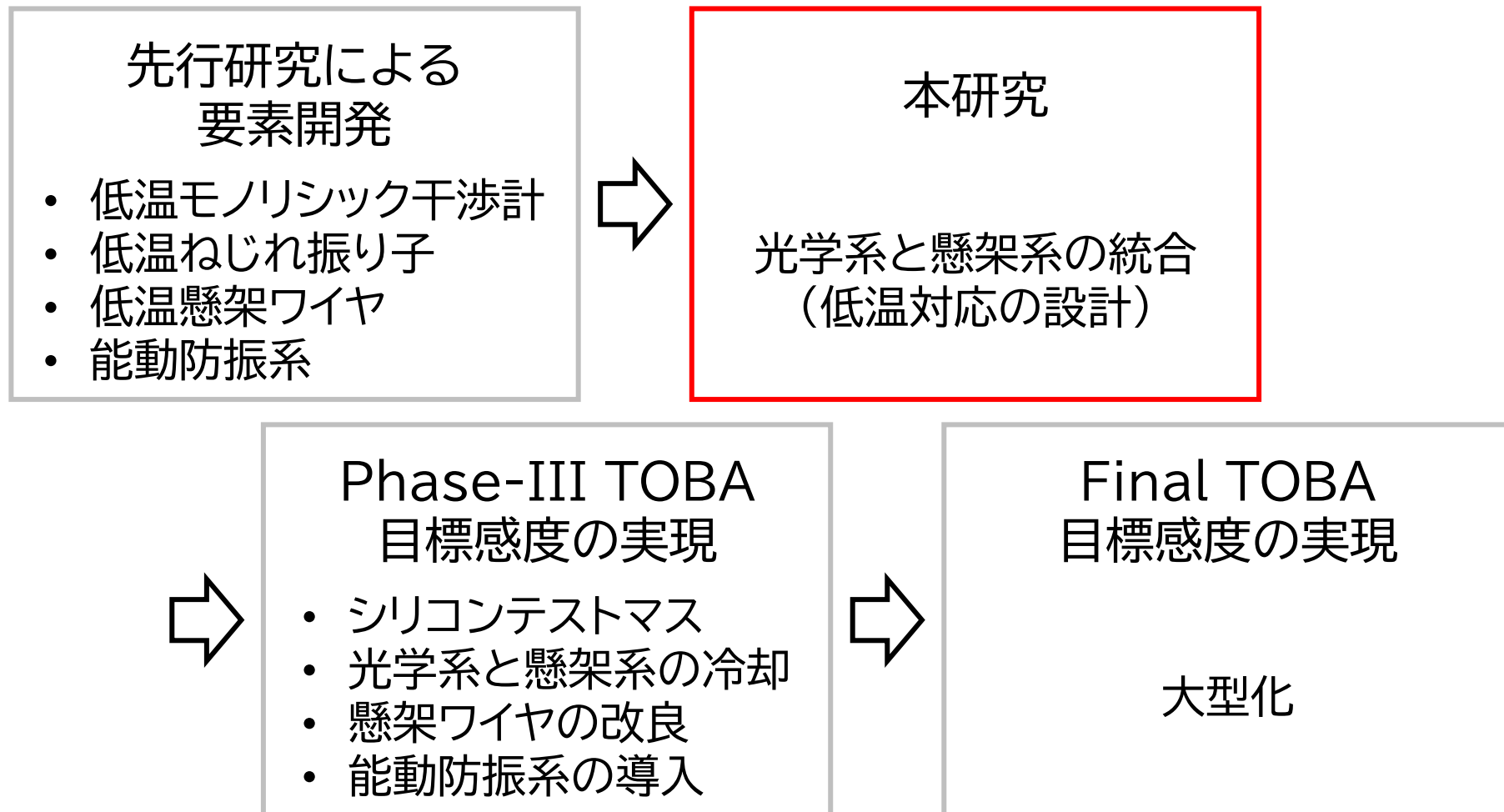
Phase-III TOBAの目標感度・雑音源

- $3.7 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz



本研究の目的

- 要素開発で明らかになった課題をもとに
TOBAの光学系と懸架系を組み合わせた実験系を完成させる



概念設計

- 低温で特性の良いシリコン製のテストマス・冷却で割れない設計
- 差動ファブリペロー共振器でのねじれ回転計測
- 並進地面振動からのカップリング雑音の低減
 - 光学ベンチの振動が雑音にならない構成
 - 縦防振の導入 / ダンピングマグネットの懸架

低温ねじれ振り子

下田智文, 博士論文 (2019)

テストマスチェーン

光学ベンチチェーン

真空槽に固定した
ダンピングマグネット

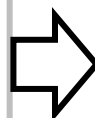
中段マス1

中段マス2

テストマス

光学ベンチ

テストマス: 銅
光学系: 光てこ



本研究

メインチェーン

ダンピングマグネットチェーン

縦防振

中段マス

マグネットサポート

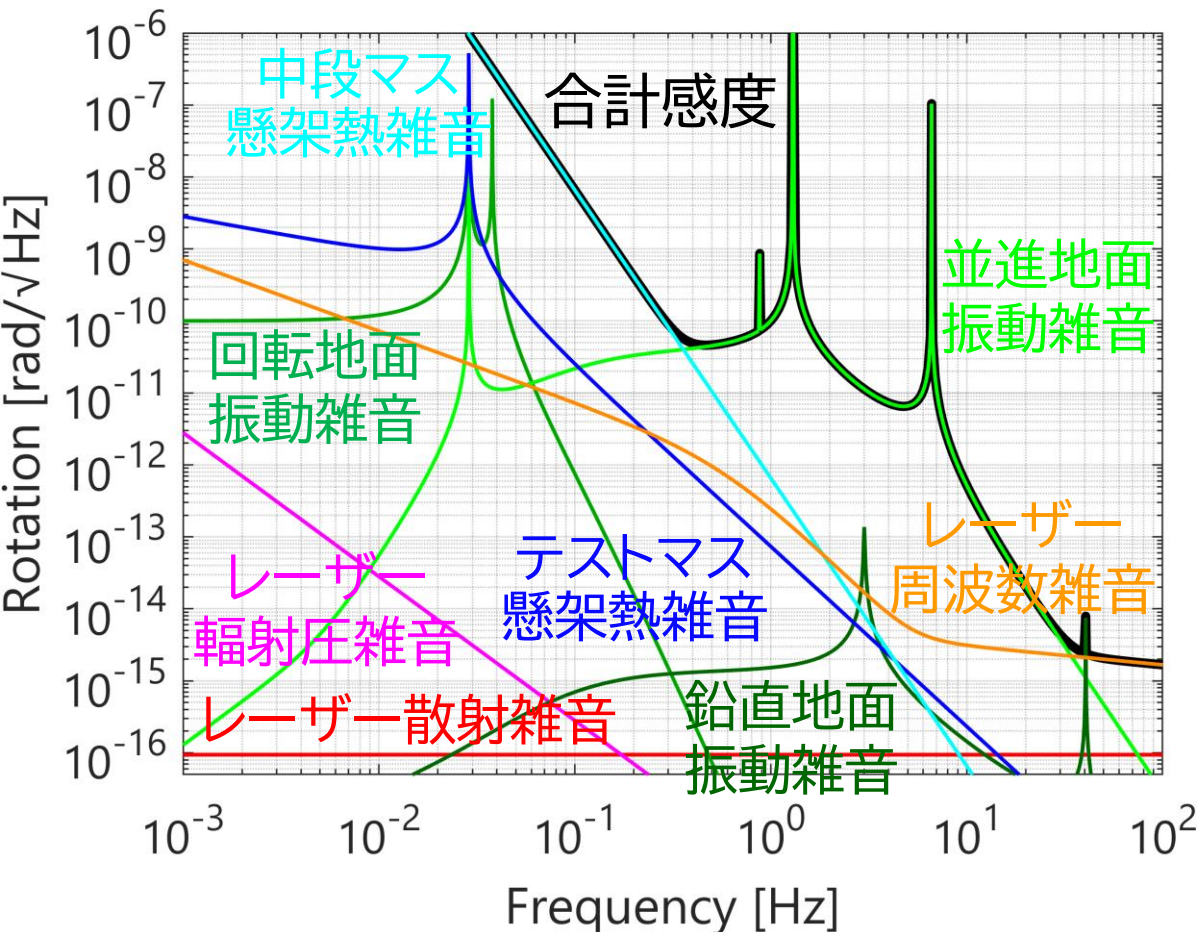
テストマス

光学ベンチ

テストマス: アルミニウム (低温シリコン仕様)
光学系: 差動ファブリペロー共振器・光てこ

本実験の設計感度

- 6.6×10^{-9} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 熱雑音と地面振動雑音で制限される



光学系

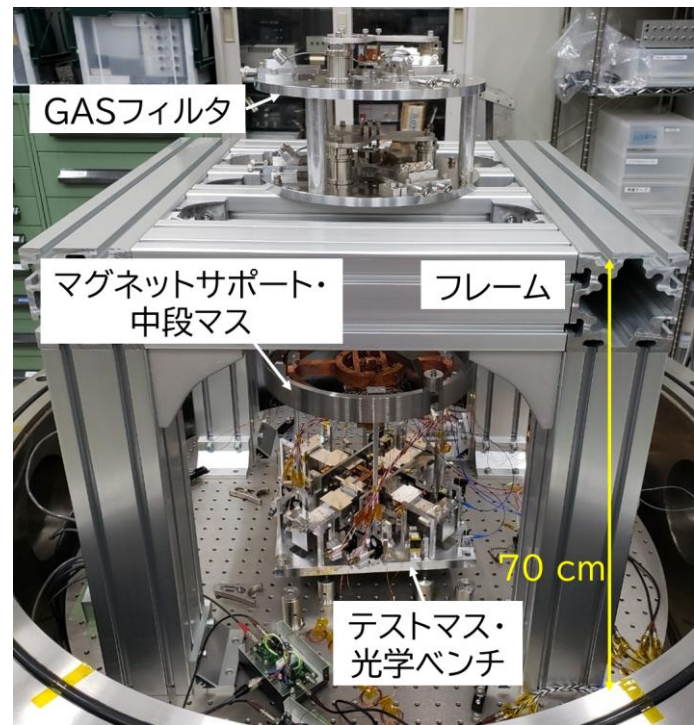
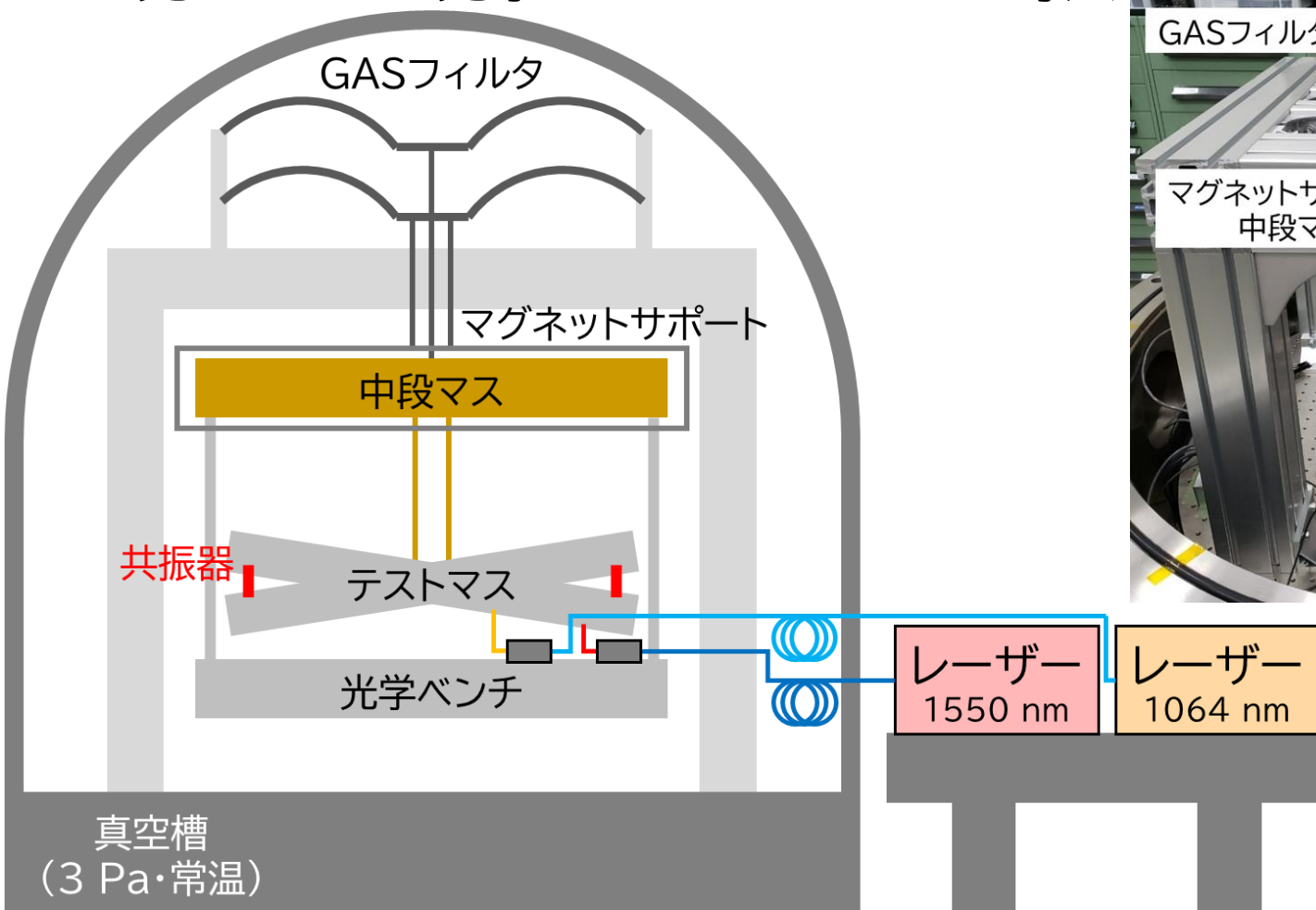
波長	1550 nm
パワー	1 mW
フィネス	300
共振器長	23 mm
共振器間距離	110 mm
同相雑音除去	1/50

懸架系

慣性モーメント	0.010 kg m ²
ワイヤ長	122 mm
ワイヤ直径	0.3 mm
ねじれ共振周波数	28.7 mHz
ワイヤQ値	10 ³
テストマス傾き	10 ⁻⁴ rad
共振器鏡傾き	10 ⁻⁴ rad
同相雑音除去	1/50
GAS共振周波数	3 Hz
温度	300 K

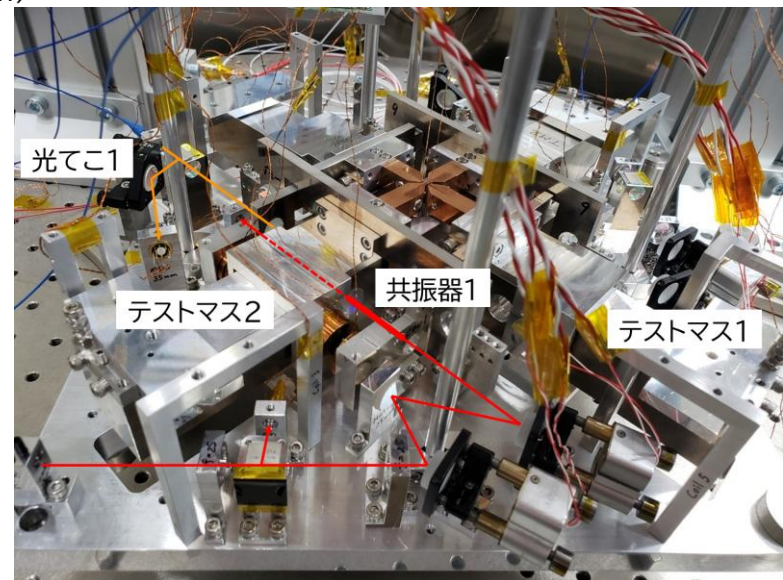
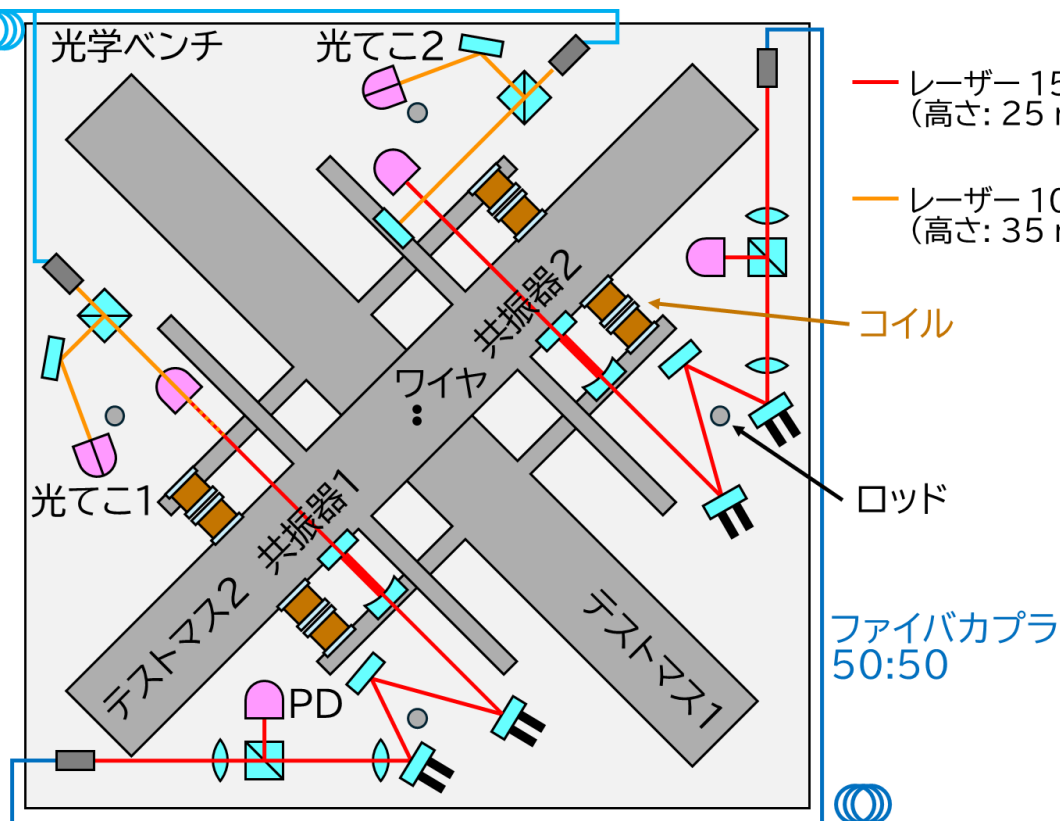
実験セットアップ全体の構成

- 真空槽内に懸架系
- 真空槽外にレーザー光源
- 光ファイバで光学ベンチにレーザーを導入



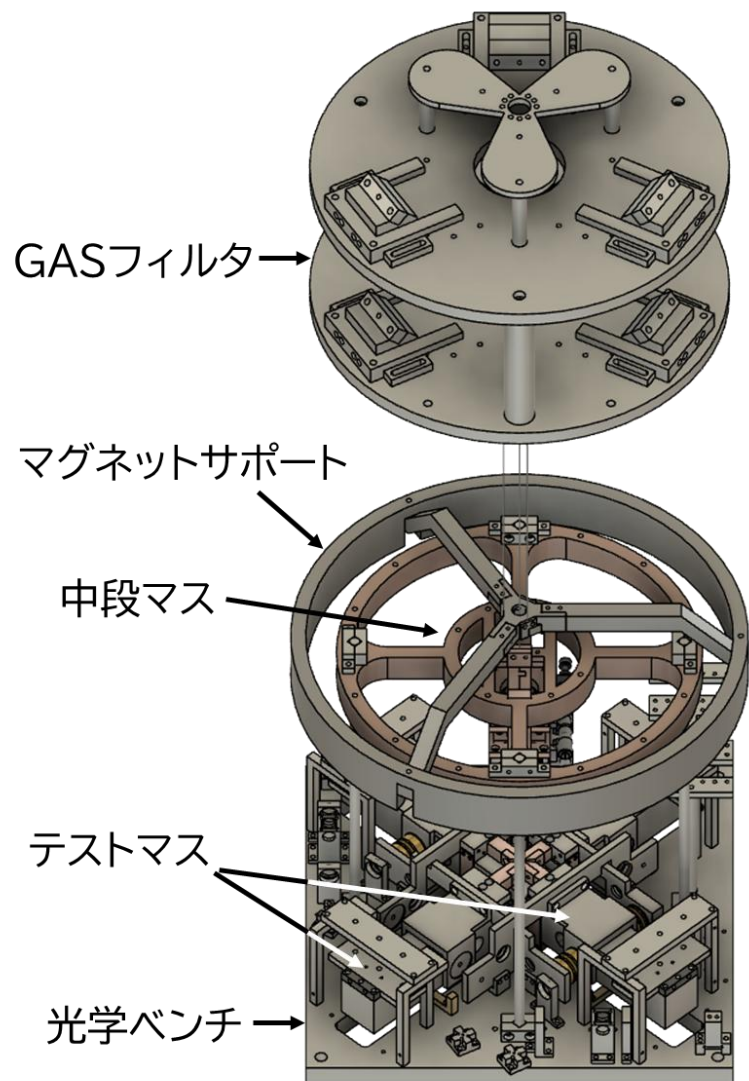
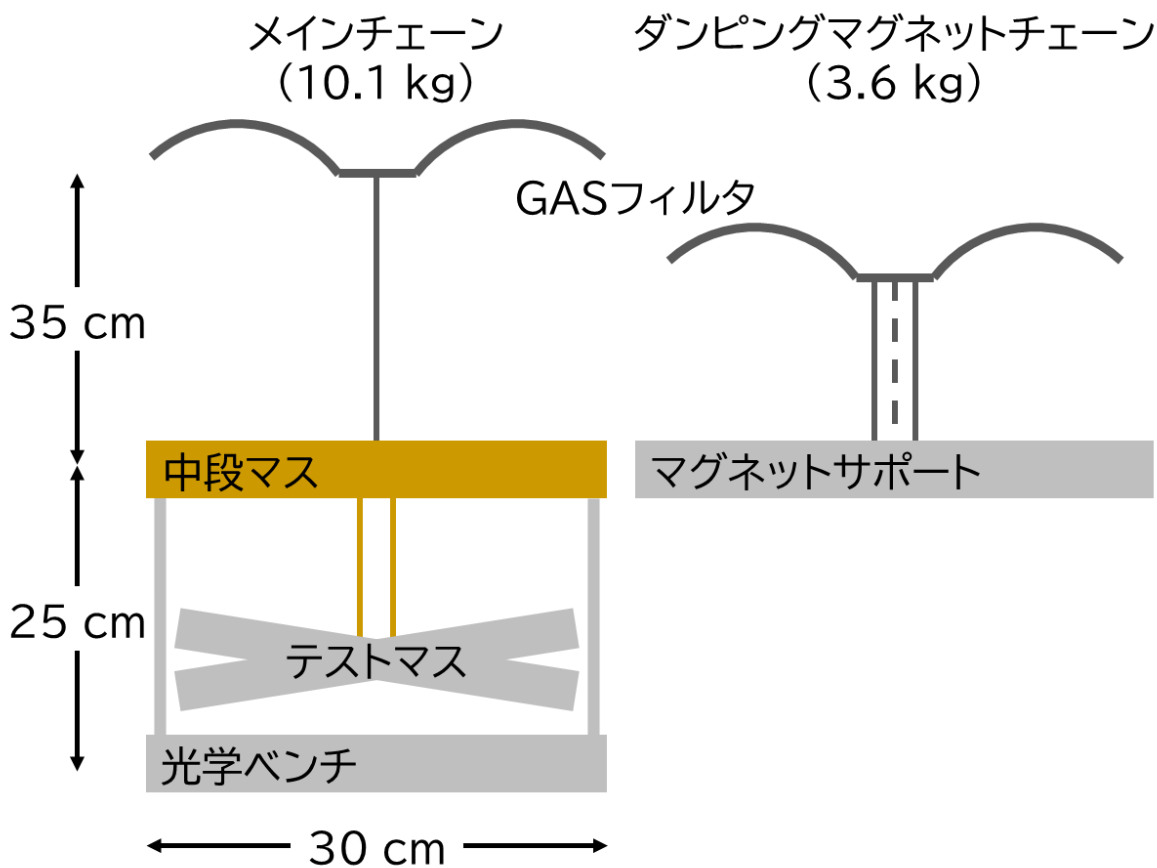
光学系の設計

- 2つのテストマス間で差動ファブリペロー共振器を構成
 - ねじれ回転を共振器の長さ変動の差として検出
 - コイル-コイルアクチュエータによるフィードバック制御でファブリペロー共振器の共振状態を保つ
- 補助センサとして光てこも設置



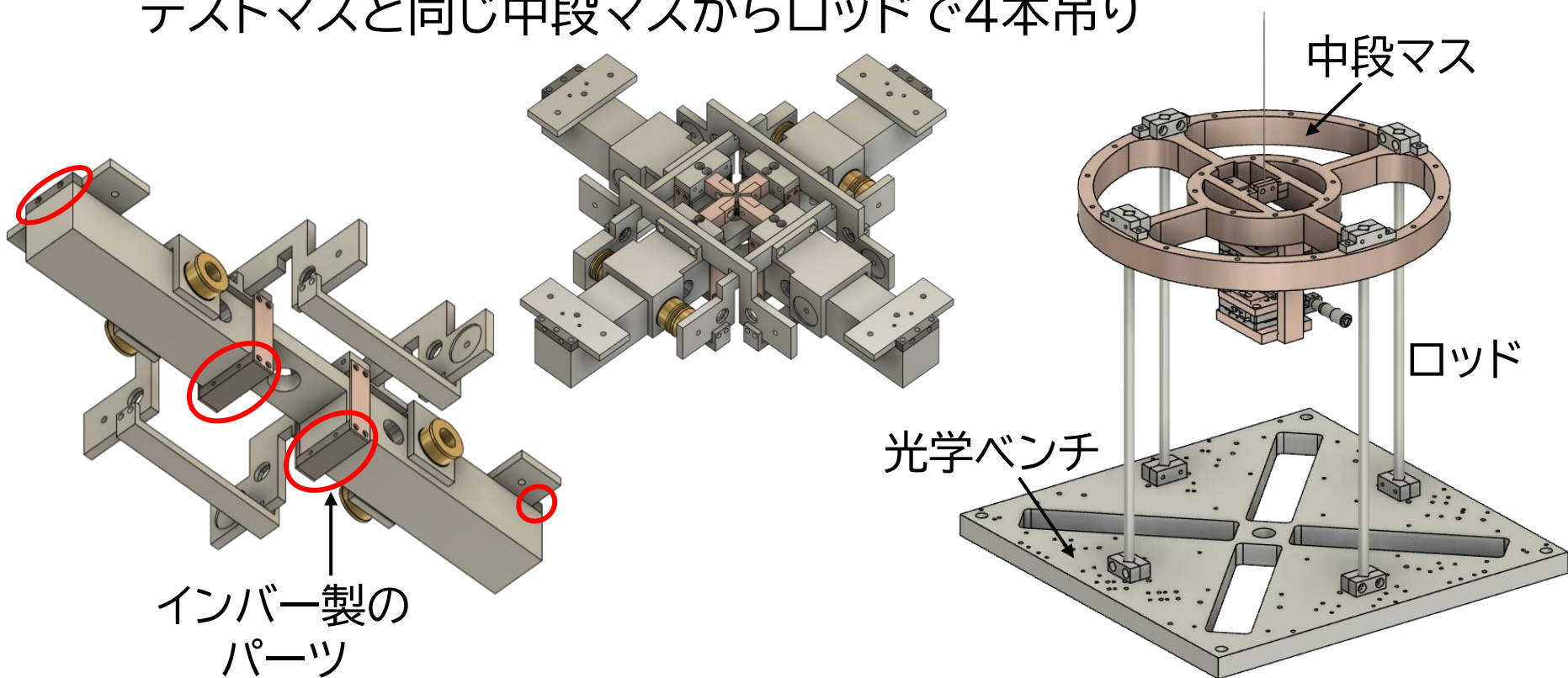
懸架系の設計: 全体

- 中段マスからテストマスと光学ベンチを懸架
- ダンピングマグネットも懸架
- 縦防振用のGASフィルタの導入



懸架系の設計: テストマス・光学ベンチ

- 低温で特製の良いシリコンを使用予定
- 冷却中にシリコンが割れないようネジを使わずインバーを接着
- 本実験ではシリコンの代わりにアルミニウムを使用
 - シリコン: 2.33 g/cm^3 , アルミニウム: 2.7 g/cm^3
- 光学ベンチの振動雑音が問題とならないよう
テストマスと同じ中段マスからロッドで4本吊り

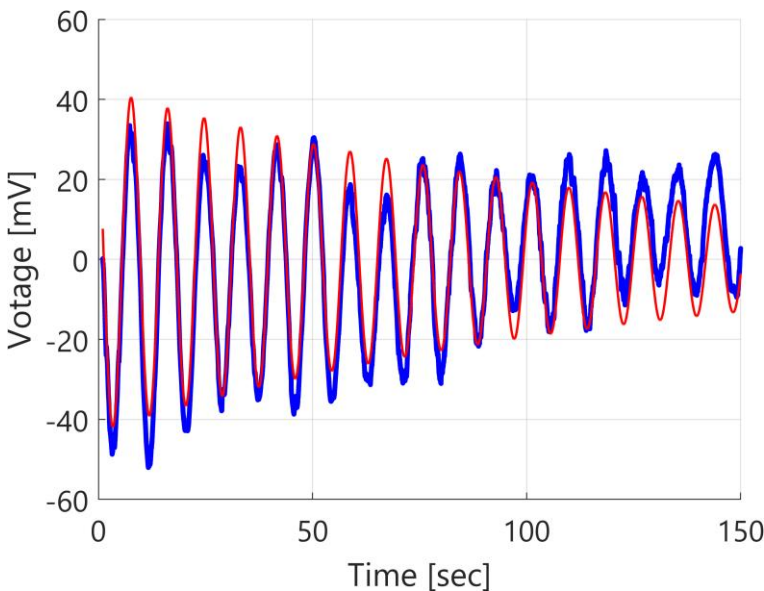


結果のまとめ

		本研究の結果	本研究の設計値	Phase-III TOBA 設計値
光学系	光てこ	回転検出	補助センサ	補助センサ
	差動 ファブリペロー 共振器	フィネス ~300 TOBA初の導入 アンロック	フィネス 400 ロックして回転検出	フィネス 50 ロックして回転検出
懸架系	テストマス	アルミニウム製(シリコン仕様) TOBA初の設計		シリコン製
	ねじれ 共振周波数	117 mHz	28.7 mHz	7.7 mHz
	ねじれQ値	~50	10^3	10^8
	テストマス傾き	$\sim 2 \times 10^{-3}$ rad	10^{-4} rad	10^{-8} rad
	GASフィルタ 共振周波数	TOBA初の導入 3-4.5 Hz	3 Hz	3 Hz
冷却系	温度	300 K	300 K	4 K
感度 @ 0.1 Hz		3×10^{-7} / $\sqrt{\text{Hz}}$	1×10^{-8} / $\sqrt{\text{Hz}}$	4×10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$

振り子の評価: ねじれ共振周波数・Q値

- コイル-コイルアクチュエータでねじれモードを励起し
励起を止めた後の減衰振動を用いて測定 (リングダウン法)
- 大気圧下と真空下で測定

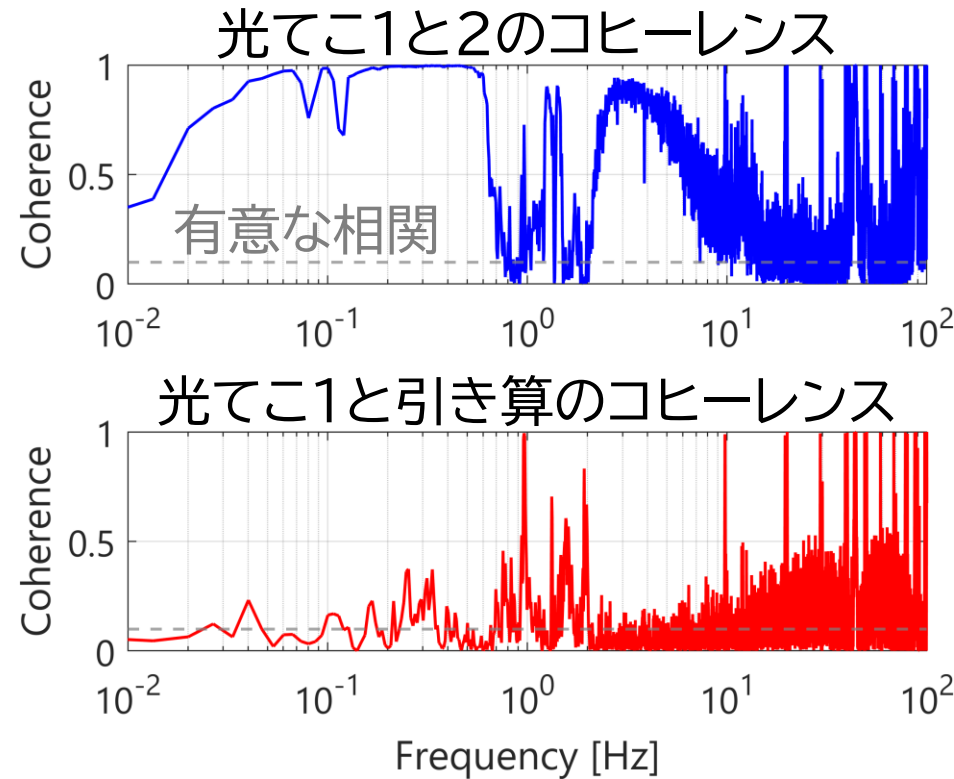
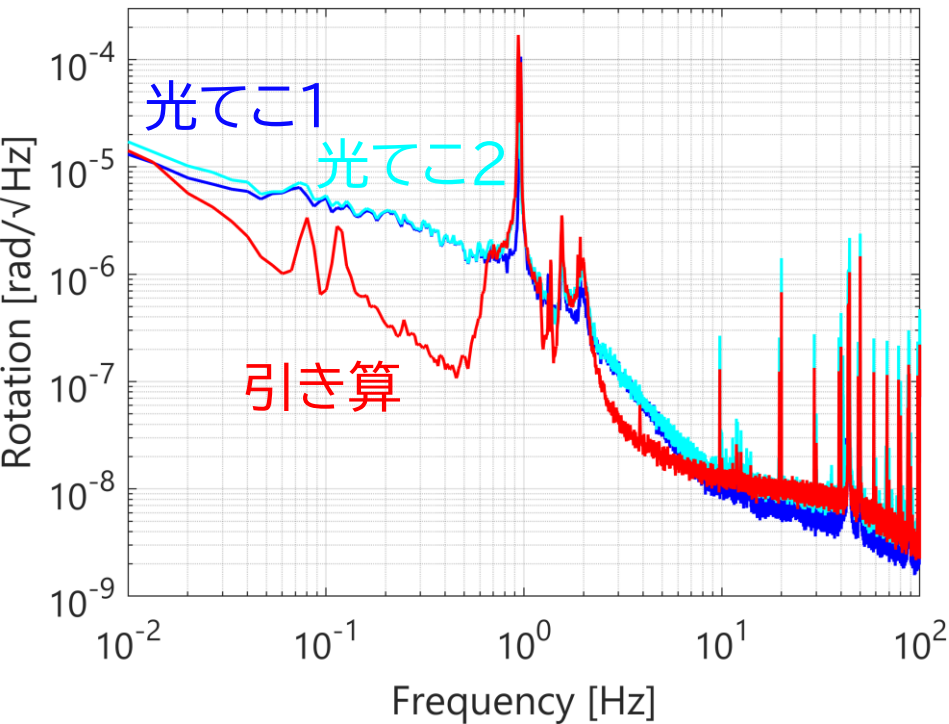


	設計値	テストマス1	テストマス2
共振周波数 [mHz]	28.7	117.9±0.1 (大気圧)	117.9±0.1 (大気圧)
		117.1±0.1 (3.5 Pa)	117.3±0.1 (3.5 Pa)
Q値	1000	55.2±0.4 (大気圧)	39.8±0.2 (大気圧)
		66.8±1.5 (3.5 Pa)	46.5±0.3 (3.5 Pa)

- コイルのワイヤによりねじれの復元力が大きくなったため
→ より細いワイヤの使用 / 非接触での電流供給 /
コイル-コイルアクチュエータを使わない共振器制御

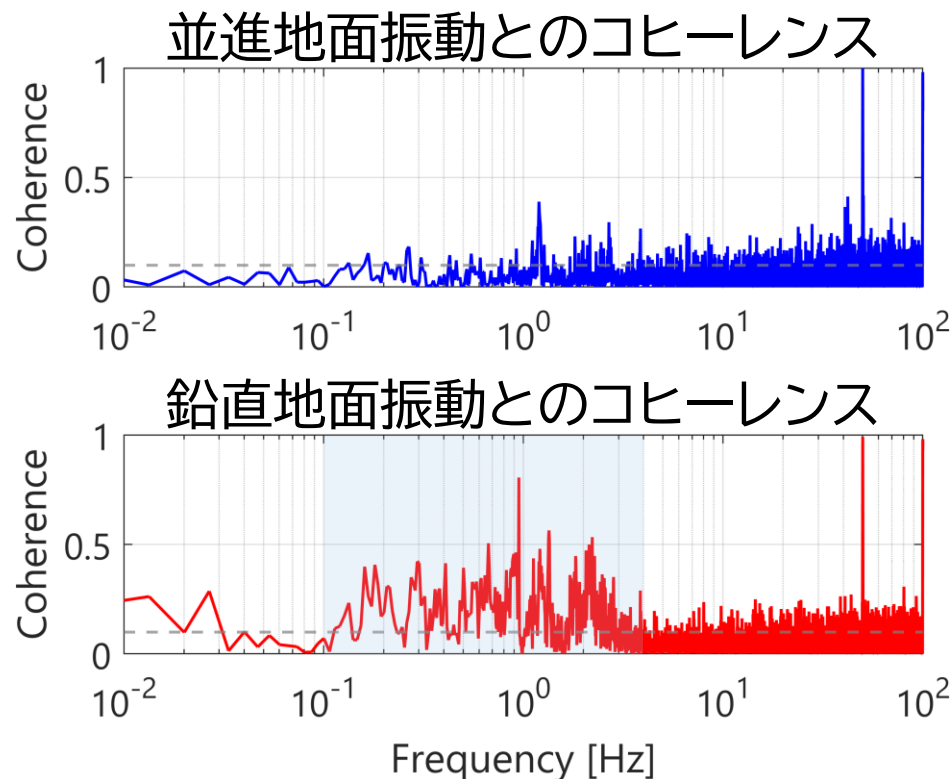
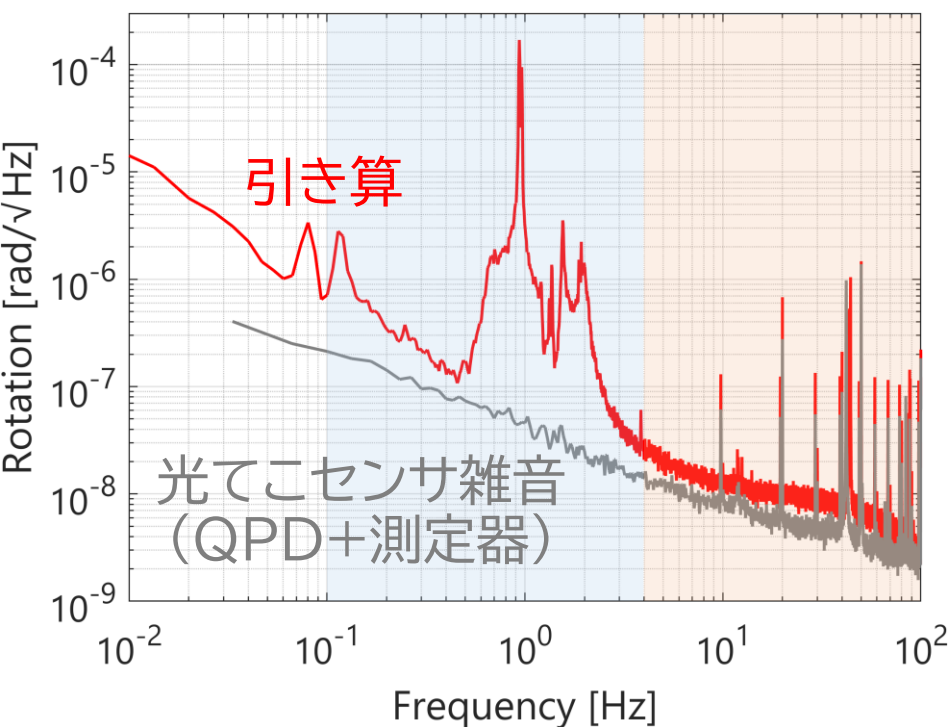
回転感度

- 光てこで回転測定を行った
- 2つのテストマス間で同相雑音除去
- 1.1×10^{-7} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.4 Hz



雑音源・感度向上に向けての考察

- 4 Hz以上は光てこのセンサ雑音が支配的
→ 共振器での検出にすることで感度向上が期待できる
- 0.1 Hz-4 Hzでは鉛直方向の地面振動雑音と有意な相関がある
→ 光学ベンチの振動由来でない場合は
テストマスの傾き / 鏡の傾き / GASフィルタによる防振比の
低減が必要

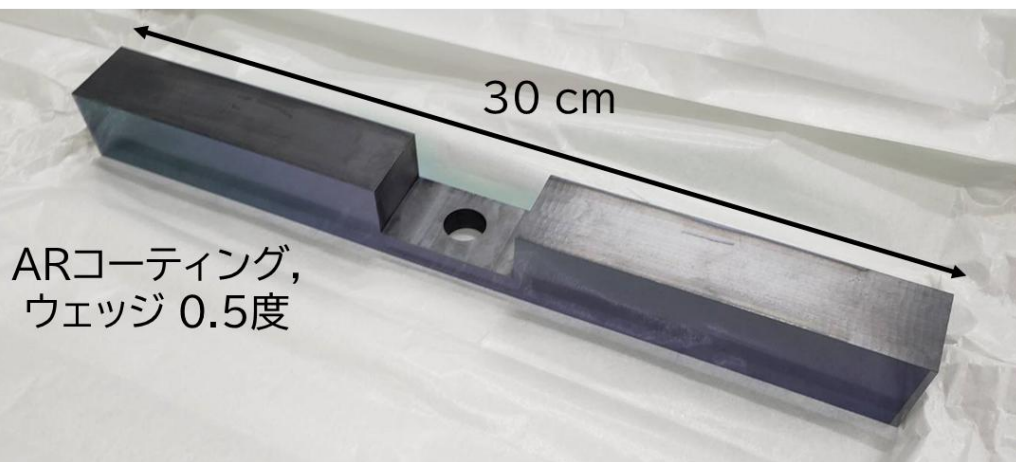


今後の展望

- ファブリペロー共振器をロックしねじれ回転を計測する
- テストマスをシリコンに置き換え冷却
 - 反射コーティングを施したテストマス調達済み



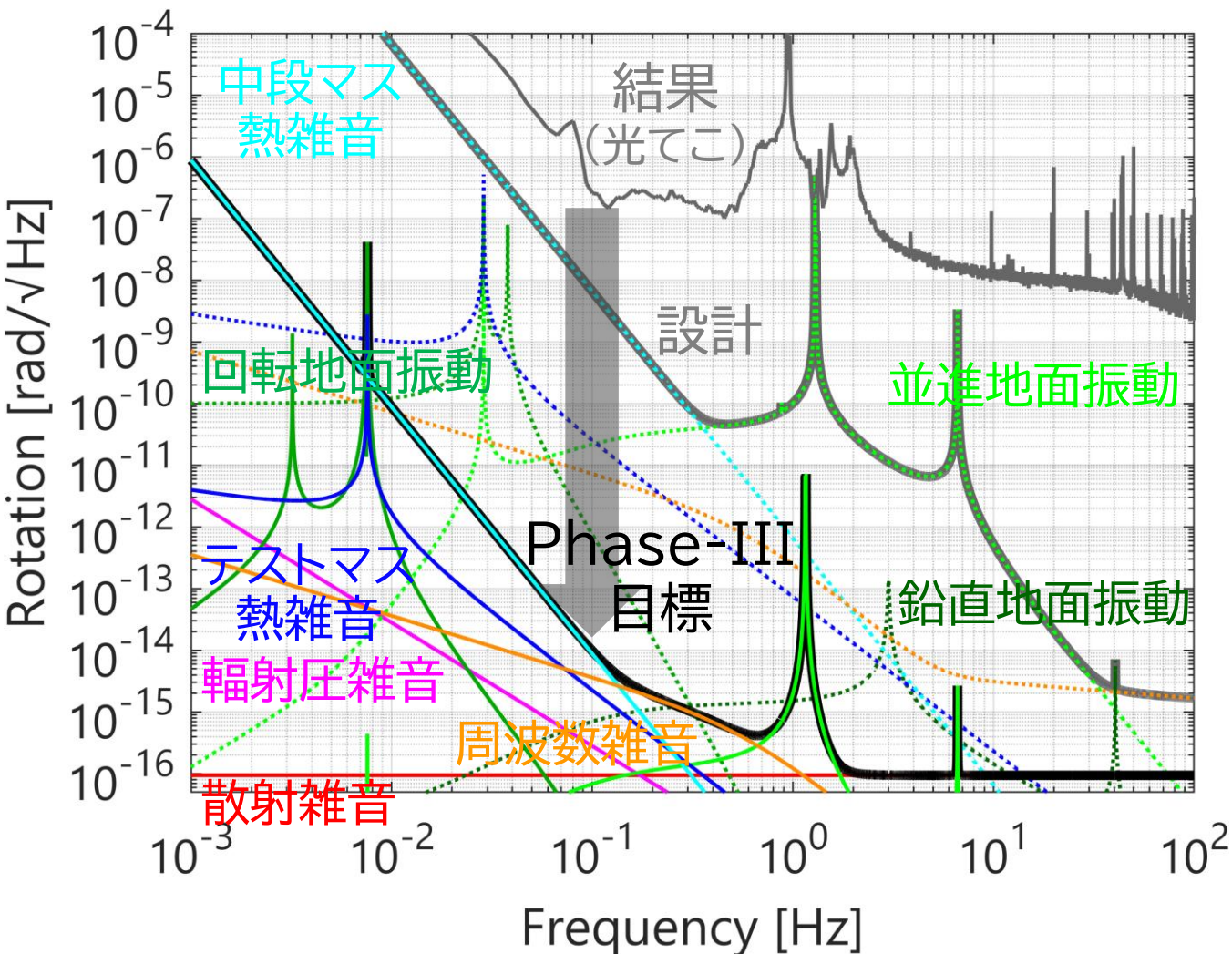
HRコーティング 99.5%



ARコーティング,
ウェッジ 0.5度

今後の展望

- 懸架ワイヤ熱雑音・地面振動雑音・レーザー周波数雑音の低減
→ Phase-III TOBAの完成へ



● 熱雑音

- 温度: 300 K → 4 K
- ベリリウム銅 → シリコン
- ねじれ共振周波数:
29 mHz → 8 mHz
- Q値: 10^3 → 10^8

● 地面振動雑音

- 能動防振 1/100
- テストマス傾き:
 10^{-4} rad → 10^{-8} rad
- 共振器鏡傾き:
 10^{-4} rad → 10^{-6} rad

● 周波数雑音

- 安定化 1/1000

まとめ

- 0.1 Hz-10 Hzの重力波観測を目指している
- 35 cmスケールのねじれ振り子型重力波望遠鏡 Phase-III TOBAを開発中である
- 光学系と懸架系を組み合わせた設計・開発を行った
 - 差動ファブリペロー共振器(TOBA初)・光てこ
 - 低温シリコン仕様・アルミニウム製のねじれ振り子
 - 縦防振のためのGASフィルタ(TOBA初)
 - 性能評価・光てこによる回転計測
- TOBAの光学系と懸架系の構成を確立し TOBAの目標感度実現に向けた道を拓いた

